Mesures du dépôt hors-cible et zones-tampons nécessaires autour des plans d'eau pour diverses applications aériennes de glyphosate

N. Payne, J. Feng et P. Reynolds

Rapport d'information FPM-X-80F
Institut pour la répression des ravageurs forestiers
Forêts Canada
Sault Ste. Marie (Ontario)
1989

Mesures du dépôt hors-cible et zones-tampons nécessaires autour des plans d'eau pour diverses applications aériennes de glyphosate

N. Payne, J. Feng et P. Reynolds

Rapport d'information FPM-X-80F
Institut pour la répression des ravageurs forestiers

93-02790/

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1989
Numéro de catalogue Fo46-16 80F
ISBN 0-662-95435-1

Il est possible d'obtenir sans frais des exemplaires de cette publication auprès des:

Services d'information
Institut pour la répression des ravageurs forestiers
Forêts Canada
C.P. 490
Sault Ste. Marie (Ontario)
P6A 5M7

Des copies ou microfiches de cette publication sont en vente chez:

Micromédia Ltée
Place du Portage
165, rue Hôtel-de-Ville
Hull (Québec)
J8X 3X2

This publication is also available in English under the title *Off-target deposit measurements and buffer zones required around water for various aerial applications of glyphosate.*

Résumé

On a voulu déterminer le dépôt hors-cible résultant de trois types d'épandage de glyphosate sur les forêts et estimer la largeur des zones-tampons requises autour des eaux pour protéger les poissons et leurs ressources alimentaires contre des effets toxicologiques directs. Devant la difficulté d'estimer les différents bandes-tampons requises pour les diverses conditions observées (par exemple la vitesse des vents, la stabilité de la couche-limite, la dose du principe actif, etc.), on a décidé d'appliquer un scénario réaliste de pire éventualité et de recueillir les données en fonction de ce scénario. Les épandages de glyphosate (Roundup de Monsanto) ont été effectués par hélicoptère au moyen de trois types de systèmes de dispersion: une rampe MICROFOIL (Union Carbide), la Valve Boom (Waldrum Specialties) et un pulvérisateur à buse hydraulique D8-46. Les dépôts hors-cible à la surface de l'eau et des feuilles ont été mesurés à diverses distances sous le vent de plusieurs bandes traitées par vent de travers. Les concentrations de glyphosate dans l'air ont également été mesurées. À l'aide des résultats obtenus, on a formulé des équations mathématiques pour la prévision des dépôts de glyphosate sur des étendues d'eau situées sous le vent des bandes traitées. En utilisant les données publiées sur la toxicité du glyphosate pour le saumon, la truite arc-en-ciel et divers invertébrés aquatiques, on a ensuite estimé la largeur des bandes-tampons autour des étendues d'eau. En général, on a obtenu les plus forts dépôts hors-cible avec la buse et les plus faibles avec la rampe MICROFOIL. Pour tous les épandages, le dépôt hors-cible sur l'eau diminuait rapidement avec la distance sous le vent. Une bande-tampon de 25 m autour des étendues d'eau serait adéquate pour la protection du saumon, de la truite arc-en-ciel et des invertébrés aquatiques contre des effets directs importants pour deux des stratégies étudiées, c'est-à-dire avec la MICROFOIL et la Valve Boom, et une bande de 30 m est suggérée dans le cas de la troisième stratégie.

Abstract

This investigation was designed to quantify off-target deposit from three types of glyphosate application for forestry use, and to estimate the width of buffer zones required around water to protect fish and their food supply from direct toxicological effects. To overcome the difficulty of estimating different buffer widths to meet the various conditions encountered, e.g. windspeed, boundary layer stability, active ingredient application rate, etc., a realistic worts case scenario was chosen, and data were collected accordingly. Applications of glyphosate (Roundup Monsanto) were made by helicopter using three types of dispersal system, a MICROFOIL boom (Union Carbide), a Through Valve Boom (Waldrum Specialties) and a D8-46 hydraulic nozzle. Off-target glyphosate deposits on water and foliar surfaces were measured at various downwind distances from several swaths overlaid on a crosswind tract. Airborne glyphosate was also sampled. Using these measurements, mathematical equations were formulated to predict glyphosate deposits on water surfaces downwind of multiple swath applications. Based on reported measurements of the toxicity of glyphosate to salmon, rainbow trout and various aquatic invertebrates, an estimate was then made of buffer widths required around water bodies. In general, measured off-target deposit was highest from the D8-46 application, and lowest from the MICROFOIL boom application. In all applications, off-target deposit on water decreased rapidly with downwind distance. A buffer width of 25 m around water bodies is adequate to protect salmon, rainbow trout and aquatic invertebrates from significant direct effects resulting from off-target deposits from two of the use strategies tested, those using the MICROFOIL and Through Valve Boom; for the third use strategy a 30 m buffer width is suggested.

Table des matières

	Page
Résumé	iii
Abstract	iii
Remerciements	v
Introduction	1
Analyse du problème	1
Analyse du pire scénario	2
Expérience de dispersion du nuage de pulvérisation	2
Modélisation du dépôt de glyphosate pour des applications sur bandes multiples	4
Équipement et méthodes	5
Site et couvert	5
Mesures météorologiques	5
Applications de pulvérisation	6
Mesures du dépôt hors-cible	8
Méthodes d'échantillonnage	8
Quantification du glyphosate	9
Évaluation de la largeur de la zone-tampon nécessaire autour des plans d'eau	10
Résultats et analyse	11
Mesures météorologiques	11
Mesures du dépôt hors-cible	11
Dépôt hors-cible des applications sur bandes multiples	15
Effet biologique du glyphosate dans les plans d'eau	15
Évaluation de la largeur de la zone-tampon	17
Dérive du champ de pulvérisation	18
Effet de la pulvérisation de Roundup	20
Conclusion	20
Bibliographie	21

Remerciements

Les auteurs remercient le ministère des Forêts de la Colombie-Britannique et Monsanto Canada Inc. pour leur aide financière, ainsi que Ron Rowe, Brent Birkedal, Wayne Enlow, David Gubbels, Jim Beveridge et Bozena Staznik pour leur collaboration technique au cours de l'expérience de dispersion du nuage de pulvérisation.

Introduction

Le glyphosate (N-(phosphonométhyle) glycine) est un herbicide à large spectre, efficace contre les espèces vivaces à racines profondes, et aussi contre les espèces annuelles et bisannuelles d'herbes et de cypéracées dicotylédones (WSSA 1983). Le sel isopropylamine du glyphosate forme l'ingrédient actif de l'herbicide Roundup (Monsanto) homologué au Canada pour son application en foresterie. Étant donné la toxicité du Roundup pour le poisson et les arthropodes aquatiques (Folmar et collab., 1979), le ministère fédéral des Pêches et Océans et le Service de la protection de l'environnement d'Environnement Canada ont soulevé des objections à l'utilisation du Roundup près des plans d'eau en raison des risques de propagation du nuage de pulvérisation.

En maintenant une distance minimale ou zone-tampon entre l'application du pesticide et le plan d'eau, on peut réduire les effets secondaires indésirables de l'application d'herbicide. La nécessité de minimiser les dangers que représente le Roundup pour le poisson et les arthropodes aquatiques est particulièrement impérieuse dans la région côtière de la Colombie-Britannique où les sites alluviaux fertiles côtoient d'importantes rivières à saumon. La présente étude visait à quantifier les dépôts hors-cible des applications aériennes de Roundup d'un type propre à une utilisation dans les terrains montagneux de la Colombie-Britannique et à évaluer la largeur de la bande-tampon requise pour prévenir une mortalité importante chez les populations de saumons et de truites.

Cette étude porte sur le problème de la protection du poisson et des espèces aquatiques contre les effets toxicologiques directs : le problème de l'évaluation de la largeur de la bande-tampon requise pour protéger la végétation riveraine n'a pas été abordé. L'estimation de la largeur de la bande-tampon nécessaire pour protéger la végétation riveraine et toute autre végétation doit être basée sur les mesures de la phytotoxicité des dépôts sublétaux de glyphosate, lesquelles n'ont pas encore été établies et font actuellement l'objet d'études. Étant donné la nature herbicide du glyphosate, la largeur de la bande-tampon nécessaire pour protéger la végétation peut être plus importante que celle requise pour protéger les poissons et les espèces aquatiques contre les effets directs.

Analyse du problème

L'utilisation de zones-tampons permet de contrôler les répercussions sur l'environnement; cependant, ces zones ne doivent pas être plus larges que nécessaire, afin de ne pas entraver la gestion efficace des forêts. Dans la présente étude, l'évaluation de la largeur de la bande-tampon a été basée, dans la mesure du possible, sur le scénario du pire cas possible étant donné que la bande-tampon nécessaire pour protéger une région vulnérable varie selon bien des facteurs. Par exemple, l'état de la couche-limite atmosphérique (Pasquill, 1974), la structure du couvert végétal (Thom, 1975), la granulométrie des gouttes formant le nuage de pulvérisation et sa hauteur d'application (Pasquill, 1974), le volume et l'ingrédient actif, les doses d'application, ainsi que le nombre et l'espacement des bandes d'épandage influent sur la largeur de la bande-tampon. Les caractéristiques physiques et biologiques du plan d'eau tamponné, par exemple eaux stagnantes ou courantes, profondeur de l'eau, espèces de poissons présentes, influent également sur cette bande-tampon. L'utilisation du scénario du pire cas élimine le problème de définir et de réglementer des zones-tampons de diverses largeurs. Dans le pire cas, les conditions sont choisies pour donner la zone-tampon la plus large nécessaire pour limiter les effets toxicologiques indésirables de l'herbicide à un niveau acceptable.

Le problème qui consiste à évaluer la largeur d'une bande-tampon autour d'un plan d'eau a été divisé en plusieurs parties. Premièrement, on a mesuré la quantité (g/m^2) de glyphosate déposée sur les plans d'eau à diverses distances sous le vent à partir d'une seule bande d'application par vent transversal. Deuxièmement, on a calculé le dépôt de glyphosate à partir d'une application sur bandes multiples d'après les données expérimentales obtenues dans le cas d'une seule bande d'application. Cette technique a également été utilisée par l'Environmental Protection Agency des États-Unis dans

des analyses sur l'exposition (Holst, 1983). Troisièmement, les dépôts de glyphosate calculés ont été convertis en concentrations correspondantes de Roundup, en supposant un mélange uniforme de l'ingrédient actif à diverses profondeurs d'eau. Enfin, les largeurs de la bande-tampon ont été évaluées d'après les relevés de mesures de la toxicité du Roundup pour les poissons et les invertébrés aquatiques.

Les applications de pesticide peuvent nécessiter des zones-tampons face au vent, en direction transversale ou sous le vent. Des gouttes peuvent cependant être transportées sur de plus grandes distances par advection plutôt que par diffusion atmosphérique ou par le mouvement tourbillonnaire créé par l'appareil (Payne et collab., 1986). La plus large bande-tampon est donc nécessaire dans les zones sous le vent, et ceci peut valoir également pour les bandes-tampons face au vent ou en direction transversale. Pour simplifier, la présente étude ne traite que le problème de la détermination des largeurs de zones-tampons sous le vent.

La granulométrie des gouttelettes du nuage de pulvérisation influe sur la proportion du produit pulvérisé déposé hors-cible au cours d'une application de pesticide. Lorsqu'on étudie l'effet de la taille des gouttelettes sur la dispersion et le dépôt d'un nuage de pulvérisation, on peut considérer deux tailles de gouttelettes, des grosses et des petites. On distingue ces deux tailles en comparant la grandeur des vitesses de sédimentation des gouttelettes avec l'écart-type des vitesses verticales du vent dans la couche-limite atmosphérique. L'intérêt physique de cette classification réside dans le fait que la dispersion et le dépôt des petites gouttelettes peuvent être considérés, selon une première approximation, comme étant indépendants de la vitesse de sédimentation et dépendants uniquement des variables météorologiques comme la stabilité atmosphérique ou la vitesse du vent, des variables du couvert végétal comme la hauteur du couvert, ou la densité des plantes, et des variables de la pulvérisation, comme la hauteur de pulvérisation et la volatilité du mélange. Cependant, dans le cas des grosses gouttelettes, on ne peut ignorer l'effet de la vitesse de sédimentation sur la dispersion et le dépôt, mais il y a lieu de considérer le comportement de ces grosses gouttelettes en termes de balistique, avec un certain étalement du nuage autour du centre de sa masse, causé par diffusion atmosphérique (Pasquill, 1974).

La grandeur de l'écart-type de la vitesse verticale du vent varie en fonction de l'état de la couche-limite atmosphérique, notamment la stabilité atmosphérique, la vitesse géostrophique du vent et la hauteur au-dessus du sol. Les valeurs types sont $\frac{1}{4}$-$\frac{1}{2}$ m/s, ce qui donne une taille limite de 100 à 150 µm pour les petites gouttelettes. Les applications d'insecticides ULV utilisent généralement des petites gouttelettes, tandis que les applications d'herbicides produisent de grosses et de petites gouttelettes (Matthews, 1979). Étant donné que les petites gouttelettes peuvent être transportées plus loin que les grosses par l'atmosphère, la dérive des petites gouttelettes revêt généralement une plus grande importance en ce qui a trait aux répercussions environnementales. Le pire scénario décrit ci-après s'applique au dépôt hors-cible sur des plans d'eau, causé par la dérive des petites gouttelettes. Le dépôt hors-cible résultant du transport de grosses gouttelettes est étudié ci-après.

Analyse du pire scénario

Les variables prises en considération dans le choix du pire scénario sont celles qui influent sur la quantité d'ingrédient actif déposée sur l'eau en aval d'une application de pesticide. Pour la partie expérimentale de l'étude, ces variables font partie de trois catégories : celles qui ont trait à la météorologie, au couvert végétal et à la pulvérisation. Pour des raisons pratiques, un certain nombre de variables se rapportant au couvert végétal et à la pulvérisation ont été établies conformément aux conditions opérationnelles plutôt qu'au pire scénario.

Expérience de dispersion du nuage de pulvérisation

Les variables météorologiques qui influent sur la dispersion du nuage de pulvérisation sont la stabilité de la couche-limite atmosphérique, la vitesse du vent, l'humidité relative et la température

de l'air. L'influence de la stabilité atmosphérique réside dans son effet sur la vitesse et la turbulence du vent, caractérisé par une augmentation ou une diminution du brassage vertical (Thom, 1975). La couche-limite atmosphérique peut être stable, instable ou neutre (Neiburger et collab., 1973). Les conditions stables se produisent généralement la nuit et vers l'aube et le crépuscule, les conditions instables le jour lorsqu'il y a beaucoup d'ensoleillement. Les conditions neutres se rencontrent généralement lorsque le ciel est couvert ou lorsque les vents sont violents, et pendant de courtes périodes au voisinage de l'aube et du crépuscule (Sutton, 1953). Les conditions stables ont été considérées comme les conditions idéales pour minimiser le transport des grosses et des petites gouttelettes, et les organismes de réglementation partagent encore ce point de vue. Cependant, Crabbe et ses associés (Crabbe et collab., 1983; Crabbe et McCooeye, 1985) ont démontré que des conditions neutres ou instables minimisent le transport des petites gouttelettes tandis que les conditions stables peuvent l'augmenter.

La vitesse du vent est une autre variable météorologique importante qui influe sur le dépôt hors-cible. La vitesse de dépôt des gouttelettes à la surface de l'eau est proportionnelle à la concentration de gouttelettes dans l'air au-dessus du plan d'eau (Pasquill, 1974). Une augmentation de la vitesse du vent réduit la concentration des gouttelettes près du sol (Crabbe et McCooeye, 1985; Joyce et collab., 1981; Riley, 1985), en partie parce que l'efficacité de l'impact des gouttelettes augmente proportionnellement à la vitesse du vent (May et Clifford, 1967). Le pire cas pour le dépôt des gouttelettes à la surface de l'eau consiste donc à pulvériser l'herbicide lorsque les vents sont légers, mais non pas en l'absence de vent.

L'humidité relative influe également lorsqu'on utilise des pulvérisations à base d'eau (Green et Lane, 1964). L'efficacité de l'impact des gouttelettes augmente proportionnellement à leur diamètre (May et Clifford, 1967); ainsi, plus les gouttelettes sont petites, plus elles sont transportées loin étant donné que le nuage de pulvérisation se déposera plus lentement. L'humidité relative étant inversement proportionnelle à la vitesse d'évaporation des gouttelettes (Rogers, 1979), le pire cas est celui d'une pulvérisation effectuée lorsque l'humidité relative est à la limite inférieure de la plage recommandée. Une élévation de la température de l'air augmente la vitesse d'évaporation des gouttelettes (Green et Lane, 1964; Rogers, 1979) et réduit ainsi le diamètre des gouttelettes et leur efficacité d'impact, et augmente leur dérive. Le pire cas consiste donc à pulvériser lorsque la température de l'air est à la limite supérieure de la plage recommandée. En résumé, les pires conditions météorologiques pour le transport de petites gouttelettes comprennent une couche-limite stable, des vents légers, une humidité relative faible et une température de l'air élevée.

Les variables relatives au couvert végétal ont également un effet sur le dépôt hors-cible en modifiant la couche limite atmosphérique et en filtrant le nuage de pulvérisation. Les plus importantes sont la hauteur du couvert végétal, sa densité (plants/m^2) et le type de plante, c'est-à-dire des feuillus ou des conifères. Payne et collab. (1986) traitent plus en détail des effets des variables du couvert végétal. Dans la présente étude, le couvert choisi était typique de ceux nécessitant un traitement herbicide; il s'appliquait donc à l'étude mais ne constituait pas un scénario du pire cas. De petites éclaircies ont été pratiquées dans le couvert végétal, autour de chaque station d'échantillonnage, pour réduire l'interception locale du nuage de pulvérisation par le couvert végétal et exposer les collecteurs afin d'assurer un dépôt maximal.

Les variables relatives à la pulvérisation qui ont des répercussions sur la dispersion des gouttelettes comprennent la granulométrie des gouttelettes et la hauteur de pulvérisation, le volume et la dose de l'ingrédient actif, la volatilité du mélange dans le réservoir et le nombre et l'espacement des bandes traitées. Pour des raisons pratiques, la plupart de ces variables ont été établies selon la pratique. Trois applications de pulvérisation ont été testées, dont deux conçues spécialement pour produire un faible dépôt hors-cible et une autre couramment utilisée par le Service forestier de l'USDA (L. Gross, communication personnelle). La granulométrie des gouttelettes est déterminée par l'atomiseur et le réglage de l'appareil, la vitesse de l'air à la sortie de l'atomiseur et les caractéristiques physiques du mélange dans le réservoir. Toutes ces variables ont été établies en fonction de stratégies

d'utilisation expérimentées. Le nuage de pulvérisation était lâché à faible hauteur, conformément à la pratique normale (R. Rowe, communication personnelle). Cependant, cette hauteur constitue le pire cas pour le nuage de pulvérisation déposé à la surface de l'eau car le brassage et la dilution du nuage de pulvérisation augmentent proportionnellement à la hauteur d'aspersion, et le dépôt de la pulvérisation sur l'eau est proportionnel à la concentration des gouttelettes en suspension dans l'air dans la partie inférieure de la couche-limite atmosphérique (Pasquill, 1974). Les volumes d'arrosage variaient de 90 à 230 L/ha, la pratique courante voulant qu'on utilise de grands volumes d'herbicide en fonction de la hauteur et de la densité du couvert végétal. L'eau servait de diluant pour le mélange du réservoir, produisant un scénario du pire cas pour la volatilité du mélange étant donné que l'eau a une pression de vapeur relativement élevée comparativement aux autres diluants utilisés pour les applications de pulvérisation (Matthews, 1979; Riddick et Bunger, 1970). Un mélange à volatilité élevée donne une évaporation rapide des gouttelettes qui à son tour diminue la grosseur des gouttelettes et l'efficacité d'impact, d'où une dérive plus importante. La largeur des bandes traitées a également été établie selon la pratique habituelle.

Modélisation du dépôt de glyphosate pour des applications sur bandes multiples

Pour évaluer la largeur des zones-tampons nécessaires autour des plans d'eau pour protéger les poissons et les invertébrés aquatiques au cours des applications de Roundup, il faut connaître la quantité d'ingrédient actif déposée à la surface de l'eau et ses effets biologiques. Étant donné que le dépôt d'ingrédient actif et ses effets biologiques diminuent proportionnellement à la distance de l'application du nuage de pulvérisation, les répercussions sur l'environnement sont négligeables à une certaine distance de l'application, c'est-à-dire que ces répercussions sont comparables aux influences naturelles. On peut évaluer la largeur de la zone-tampon à partir de cette distance. Cette méthode a été élaborée et utilisée la première fois lors des applications de l'insecticide perméthrine (Payne et collab., 1986).

Un scénario du pire cas a également été choisi pour la modélisation du dépôt à partir d'application par bandes multiples. Le dépôt hors-cible sous le vent d'une application sur bandes multiples augmente proportionnellement à la quantité totale d'ingrédient actif pulvérisée, qui dépend elle-même de la dose d'application d'ingrédient actif et de la superficie traitée. La dose d'application d'ingrédient actif était de 2,1 kg d'équivalent acide par hectare, soit la dose maximale recommandée. Le nombre de bandes pulvérisées représentait également le pire cas, soit une superficie de 100 ha (1 sur 1 km), soit près de la limite supérieure de la superficie traitée recommandée (A. Robinson, communication personnelle). La longueur des bandes était suffisante pour que l'application soit représentative d'une source linéaire infinie à des distances sous le vent où les dépôts étaient échantillonnés (Payne, 1983) et constituait donc le pire cas pour les dépôts.

Équipement et méthodes

Site et couvert

L'expérience a été menée dans une zone presque plate de la plaine inondable de la rivière Skeena près du point repère 129°23'O, 54°19'N (figure 1). Avec la direction du vent choisie pour les essais de pulvérisation, c'est-à-dire une brise d'aval approximativement du sud-ouest, il y avait une zone de terrain presque plat, face au vent, d'environ 1 km de long, couverte d'une forêt faite en majorité de feuillus dont la hauteur du couvert variait de 10 à 30 m. En amont se trouvait une zone d'environ 3 km comprenant une plaine inondable boisée et un plan d'eau libre. Sur cette distance le fond de la vallée avait une largeur d'au moins 2,5 km. Les directions du vent appropriées aux essais se limitaient aux vents qui montaient ou descendaient la vallée en raison des tourbillons sous le vent causés par le déplacement de l'air au-dessus des montagnes (Atkinson, 1981; Scorer, 1978), et provoquant une dispersion irrégulière du nuage de pulvérisation.

Le site de la pulvérisation consistait en une coupe faite en 1968-1969 avec un nouveau couvert végétal, constitué en grande partie de feuillus, dont la composition des espèces et la hauteur des arbres figurent au tableau 1. La composition du couvert et la hauteur des arbres ont été mesurées à cinq endroits, espacés de 100 m, le long d'un transect traversant ce site. Tous les arbres dans un rayon de 10 m autour de ce site ont été comptés et la hauteur de 10 arbres choisis au hasard a été mesurée. Le site était couvert d'aulnes rouges, avec d'épais taillis de saules près des canaux latéraux étroits qui traversaient ce site à deux endroits.

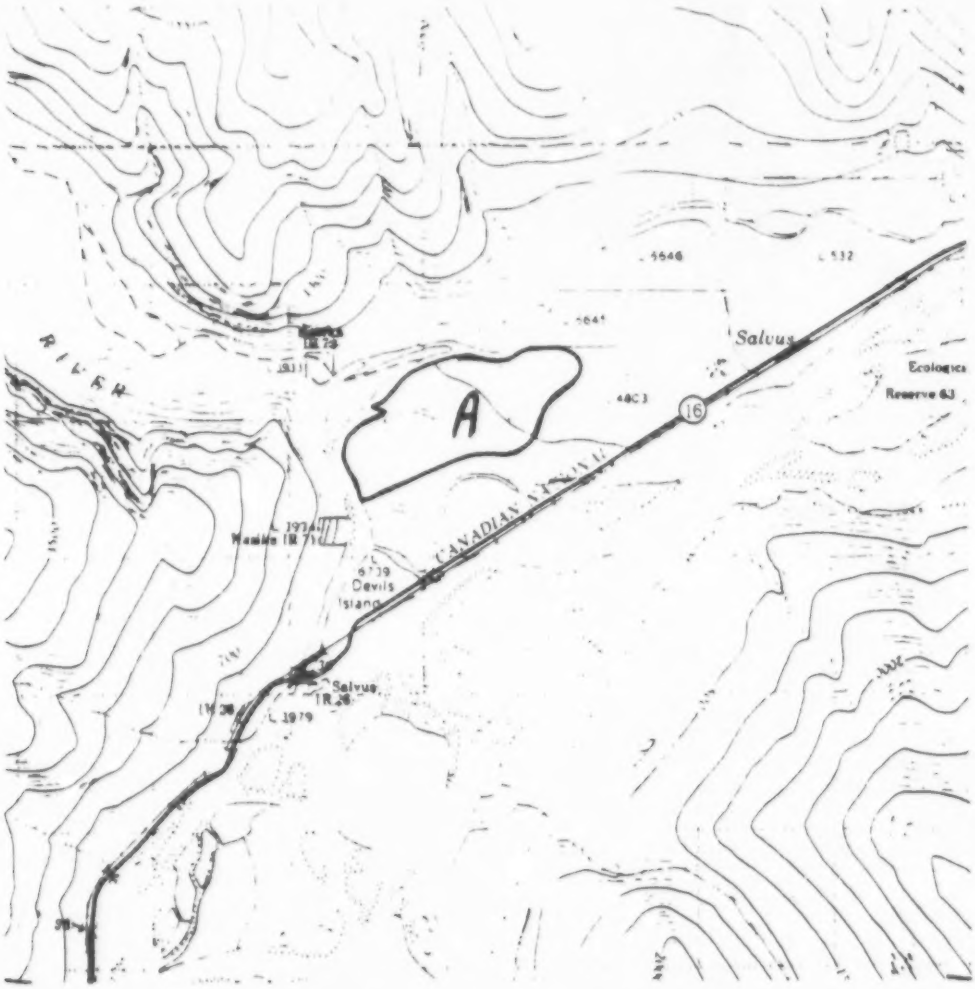

Figure 1. Partie de la carte topographique (1/50 000, 103-I/6, Salvus, grille de 1 km), indiquant l'emplacement du site expérimental (A) dans la vallée de la rivière Skeena.

Mesures météorologiques

Les mesures météorologiques sur le terrain ont été utilisées pour choisir les conditions de pulvérisation appropriées et caractériser les conditions existant au cours de l'application et de la dispersion du nuage de pulvérisation. La vitesse du vent a été mesurée à 13 et à 22 m au-dessus du niveau du sol, avec des anémomètres à coupelles (vitesse seuil 0,34 m/s, ordinateur météorologique numérique Heathkit modèle ID-4001, Heath Co., Benton Harbour, MI). À 13 m au-dessus du sol,

l'anémomètre inférieur se trouvait juste au-dessus du couvert végétal. La vitesse apparente du vent a été ajustée de façon à évaluer la vitesse réelle du vent à l'aide des courbes d'étalonnement mesurées sur un bras d'étalonnement conçu et construit à l'Institut pour la répression des ravageurs forestiers (IRRF). La direction du vent a été mesurée à 22 m au-dessus du sol (girouette, ordinateur météorologique numérique Heathkit) La température de l'air a été mesurée à 13 et à 22 m au-dessus du sol avec des capteurs de type diode (ordinateur météorologique numérique Heathkit ID-4001), abrités de façon à éviter le réchauffement par rayonnement. L'humidité relative a été mesurée à 2 m au-dessus du sol (hygromètre de type à capacitance, Heath Co.) au cours de l'application et de la dispersion du nuage de pulvérisation. Les mesures météorologiques ont été enregistrées à la main, à intervalles de 30 secondes, au cours de l'application et de la dispersion du nuage de pulvérisation, soit une période de 20 à 30 minutes selon la vitesse du vent.

Tableau 1. Composition du couvert végétal sur le site de la pulvérisation

Espèce	Densité des plantes (nombre moyen de tiges/ha)	Hauteur des plantes (m) (moyenne/É.-T.)
Aulne rouge (*Alnus rubra* Bong)	1 318	17,3/4,3
Peuplier baumier de l'Ouest (*Populus trichocarpa* Torr. & Gray)	146	27,3/2,1
Saule de Bebb (*Salix bebbiana*)	1 236	9,7/2,2

Applications de pulvérisation

Les essais ont été faits à l'aide de trois stratégies différentes. On a choisi d'utiliser un hélicoptère pour toutes les applications en raison de sa manœuvrabilité permettant d'appliquer des pesticides en terrain montagneux. Différents systèmes de dispersion ont été utilisés à chaque essai, mais les hauteurs de pulvérisation et les conditions météorologiques étaient semblables dans tous les essais.

L'application pour l'essai numéro 1 a été faite à l'aide d'un bras MICROFOIL. La dose et le volume d'application de l'ingrédient actif étaient respectivement de 3,4 kg/ha d'équivalent acide et 230 L/ha par bande traitée. La dose d'application d'ingrédient actif a été choisie de façon à fournir des résidus décelables aux stations d'échantillonnage situées le plus en aval; cependant, les résultats présentés ci-dessous correspondent au dosage maximal recommandé de 2,1 kg/ha d'équivalent acide. Le volume d'application est représentatif des applications d'herbicide dans lesquels un couvert végétal dense pluriétagé est traité. Le transport de la matière pulvérisée à partir du bras MICROFOIL du pulvérisateur est relativement faible dans les conditions d'utilisation (Yates et collab., 1978); le volume d'application est cependant élevé, et par conséquent la cadence de travail est faible. Le bras MICROFOIL est ajusté de la façon recommandée par le fabricant pour assurer un minimum de dérive (manuel de l'utilisateur du bras MICROFOIL). Le mélange pulvérisé comportait 4,2 % en volume de Roundup et d'eau, c'est-à-dire 1,5 % en poids de solution de sel d'isopropylamine de glyphosate. D'après une étude précédente (van Vliet et collab., 1986) dans laquelle la buse, l'orientation de la buse, la pression interne dans le bras, le vent latéral et le mélange dans le réservoir étaient semblables à cette application, les gouttelettes de l'essai numéro 1 devaient avoir un volume et un diamètre médians respectifs d'environ 3 000 et 2 700 microns lors de la pulvérisation. Van Vliet et collab. (1986)

ont trouvé qu'environ 4 % des gouttelettes avaient un diamètre inférieur à 1 600 microns, représentant environ 0,63 % du volume du nuage de pulvérisation à la sortie.

La longueur et le nombre des bandes traitées étaient un facteur important dont il fallait tenir compte dans la conception des essais de pulvérisation. Les mesures du dépôt moyen dans une seule bande étaient nécessaires pour la modélisation. À chaque essai, plusieurs bandes de terrain étaient traitées le long d'une piste exposée à un vent transversal afin de réduire la variabilité des dépôts et déposer une quantité suffisante d'ingrédient actif pouvant être décelée aux stations d'échantillonnage situées le plus loin en aval du vent. Chaque bande de terrain était suffisamment longue pour satisfaire les conditions de ligne infinie. Trois bandes de 300 m de long ont été pulvérisées dans l'essai numéro 1.

Dans l'essai numéro 2, l'application a été faite à l'aide d'un bras à valve Thr (TVB). Les doses et les volumes d'ingrédient actif étaient respectivement de 2,2 kg/ha d'équivalent acide et 91 L/ha par bande de terrain. Le bras TVB est un nouveau système de pulvérisation introduit en 1983 et qui est censé fournir un bon contrôle de la dérive des gouttelettes (essais du fabricant). D'après l'essai numéro 2, le bras TVB donne des débits d'application plus faibles et par conséquent une cadence de travail plus élevée qu'avec le bras MICROFOIL utilisée à l'essai numéro 1. Le bras TVB avait une longueur de 9,14 m et était équipé de 62 buses ébarbées de 0,045 po (1,14 mm de diamètre intérieur) et d'orifices de contrôle de 2,03 mm, les buses étant régulièrement espacées le long du bras et pointées vers l'arrière pour réduire la vitesse relative du liquide; chaque buse comprenait 15 jets. Le bras TVB était monté à l'avant d'un hélicoptère Bell 47-T qui volait à une vitesse d'environ 20,1 m/s, à environ 3 m au-dessus du couvert végétal. La pression dans le bras était de 171,75 kPa, et le débit total était d'environ 165 L/min. La largeur de pulvérisation nominale était de 15 m. Le mélange pulvérisé consistait en 6,7 % en volume de Roundup et d'eau, c'est-à-dire 2,4 % en poids de solution de sel isopropylamine de glyphosate. D'après une étude précédente (van Vliet et collab., 1986) dans laquelle la buse, l'orientation de la buse, la pression du bras, la pulvérisation perpendiculaire au vent et le mélange étaient semblables à ceux utilisés dans cette application, les gouttelettes de l'essai numéro 2 devaient avoir un volume et un diamètre médians respectifs d'environ 1 000 et 150 microns à la sortie des buses. Van Vliet et collab. (1986) ont trouvé qu'environ 30 % des gouttelettes avaient un diamètre inférieur à 100 microns, soit 0,04 % du volume du nuage de pulvérisation. Au cours de l'essai numéro 2, cinq bandes de terrain de 300 m de long ont été pulvérisées.

L'application de l'essai numéro 3 a été réalisée à l'aide d'un bras hydraulique D8-46. La dose et le volume d'application de l'ingrédient actif étaient respectivement de 2,1 kg/ha d'équivalent acide et 90 L/ha par bande de terrain. Cette stratégie d'utilisation est souvent utilisée au cours des applications d'herbicide du Service forestier de l'USDA (L. Gross, communication personnelle). Le bras avait 8,53 m de long et était équipé de 32 buses coniques creuses (disque numéro 8, plaque tournante numéro 46). Les buses étaient espacées régulièrement le long du bras et pointées vers l'arrière pour réduire la vitesse relative du liquide. Le système de pulvérisation était monté au milieu d'un hélicoptère Bell 47-T qui se déplaçait à une vitesse d'environ 20,1 m/s, à environ 3 m au-dessus du couvert végétal. La pression du bras était d'environ 171,75 kPa et le débit total était de 163 L/min. La largeur nominale pulvérisée était de 15 m. Le mélange pulvérisé consistait en 6,5 % en volume de Roundup et d'eau, c'est-à-dire 2,3 % en poids de solution de sel isopropylamine de glyphosate. D'après une étude précédente (Yates et collab., 1985) dans laquelle la buse, l'orientation de la buse, la pression du bras, la pulvérisation perpendiculaire au vent et le mélange étaient semblables à ceux utilisés au cours de cette application, les gouttelettes devaient avoir un volume et un diamètre médians respectifs d'environ 460 et 70 microns à la sortie des buses. Yates et collab. (1985) ont trouvé qu'environ 60 % des gouttelettes avaient un diamètre inférieur à 100 microns, soit environ 1 % du volume de produit pulvérisé. Au cours de l'essai numéro 3, quatre bandes de terrain de 300 m de long ont été pulvérisées.

La longueur du bras devrait être inférieure au diamètre du rotor pour réduire l'effet de mouvement tourbillonnaire de l'hélicoptère sur la dispersion du nuage de pulvérisation et la largeur

de l'arrosage (Quantick, 1985). Au cours des essais numéros 1, 2 et 3, la longueur du bras était d'environ 69, 79 et 74 % du diamètre du rotor (11,5 m).

Mesures du dépôt hors-cible

Méthodes d'échantillonnage

La figure 2 montre le site expérimental; les bandes à traiter étaient situées le long d'une piste perpendiculaire au vent et orientée NO-SE (B). Les stations d'échantillonnage (C) se trouvaient à 25, 50, 75, 100 et 200 m mesurés le long de la bissectrice perpendiculaire (NE-SO) de la piste perpendiculaire au vent.

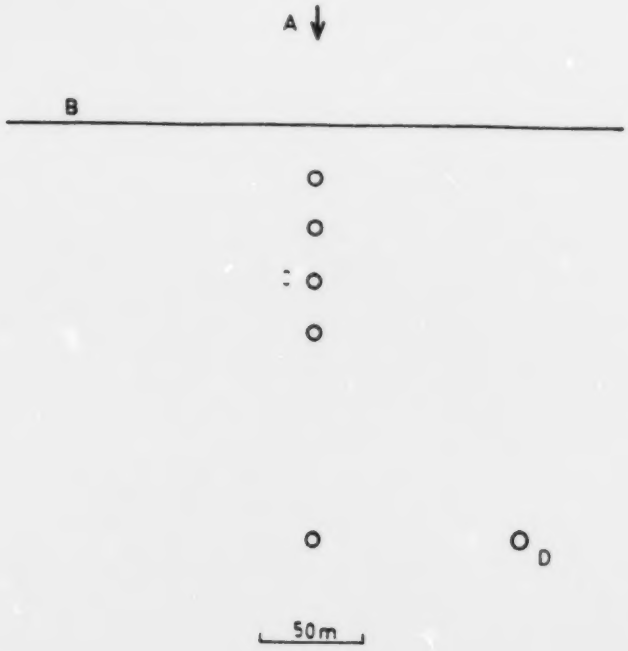

Figure 2. Schéma (à l'échelle) de l'expérience de dispersion du nuage de pulvérisation avec une direction du vent prévue (A), une piste de 300 m perpendiculaire au vent (B), des stations d'échantillonnage (C) et une station météorologique (D).

On a mesuré le dépôt de glyphosate à la surface de l'eau et des feuilles ainsi que la dose de glyphosate par unité de surface. Les directions moyennes du vent au cours des applications s'écartaient d'au plus 20 degrés par rapport à la direction prévue (A) -SO, et les distances sous le vent des stations à partir des bandes de terrain pulvérisées correspondaient à un écart de 6 % par rapport aux valeurs prévues. Par conséquent, aucune correction n'a été apportée aux distances sous le vent. Une coupe circulaire de 8 m de diamètre (50 % de la hauteur du couvert végétal) a été pratiquée autour de chaque station d'échantillonnage pour réduire l'interception du nuage de pulvérisation par le couvert végétal.

On a échantillonné le dépôt de glyphosate à la surface de l'eau dans toutes les stations avec des collecteurs constitués d'une feuille de polyéthylène de 0,3 sur 1 m fixée sur une plus grande feuille de polyéthylène (2 sur 2 m) qui était posée sur une superficie semblable exempte de végétation. Du point de vue aérodynamique, ces collecteurs étaient semblables à un plan d'eau et l'air s'écoulait au-dessus de ces collecteurs comme au-dessus d'un plan d'eau. On a donc supposé que les dépôts du nuage de pulvérisation à la surface de l'eau et à la surface des collecteurs étaient semblables. Une feuille était exposée dans les trois stations d'échantillonnage qui se trouvaient le plus près de la bande d'épandage,

et la superficie était doublée aux stations qui se trouvaient à 100 et à 200 m. Chaque feuille d'échantillonnage était doublée au cours des deuxième et troisième essais pour prévenir toute contamination. Les dépôts de glyphosate sur les feuilles d'échantillonnage ont été quantifiés.

Les dépôts foliaires aux stations situées à 50, à 100 et à 200 m ont été échantillonnés avec des collecteurs faits d'une branche d'aulne rouge, sur laquelle les surfaces supérieures et inférieures de 10 feuilles choisies au hasard ont été couvertes d'une feuille de polyéthylène coupée de façon à épouser la forme de la feuille. L'aulne rouge a été choisi comme espèce adventice ligneuse commune dans les applications d'herbicide en Colombie-Britannique: une branche apicale était maintenue verticalement à la cime des arbres et une branche dorsale était maintenue horizontalement à environ 2 m au-dessus du sol. Ces branches étaient fixées sur des mâts légers conçus pour une utilisation dans un couvert forestier (Beveridge et Payne, 1986). Les dépôts de glyphosate ont été quantifiés sur les feuilles de polyéthylène. La superficie de ces feuilles de polyéthylène a été mesurée à l'aide d'un planimètre polaire (Davis et Kelly, 1967).

La dose de glyphosate par unité de surface est la quantité totale d'ingrédient actif qui se dépose sur une superficie de 1 m^2 de terrain perpendiculaire au vent (Davies, 1966). C'est un indicateur de la quantité d'i.a. que pourraient respirer les personnes et les animaux. Étant donné que le glyphosate a une pression de vapeur très faible (WSSA, 1983), l'ingrédient actif en suspension dans l'air est en grande partie contenu dans les gouttelettes du nuage de pulvérisation. Les mesures de la dose de glyphosate par unité de surface ont été faites aux stations d'échantillonnage de 50, de 100 et de 200 m à l'aide d'échantillonneurs Rotorod (Ted Brown Associates, 26338 Esperanza Drive, Los Altos Hills, CA 94022) qui collectent les gouttelettes par impact inertiel (figure 3). D'après les mesures de l'efficacité d'impact (May et Clifford, 1967), ces appareils devaient recueillir toutes les gouttelettes contenues dans le volume d'air échantillonné, et le dépôt de glyphosate (g/m^2) sur la surface collectrice est donc proportionnel à la dose de glyphosate par unité de surface. Les gouttelettes ont été recueillies sur deux cylindres de teflon d'un diamètre extérieur de 2,6 mm, montés sur des tiges en forme de U: ce modèle d'échantillonnage a été mis au point par l'IRRF. À chaque station, deux échantillonneurs étaient montés sur des mâts légers, l'un au faîte des arbres et l'autre à environ 2 m au-dessus du sol. On a quantifié les dépôts de glyphosate sur les cylindres de teflon.

Les valeurs présentées dans le rapport sont la moyenne des mesures des dépôts de glyphosate sur les feuilles et sur les surfaces collectrices Rotorod au faîte des arbres et à 2 m au-dessus du sol. On a également fait la moyenne des dépôts foliaires de glyphosate sur les surfaces supérieures et inférieures des feuilles.

Tous les collecteurs ont été exposés pendant un maximum de 30 minutes après la pulvérisation pour attendre l'advection du nuage de pulvérisation sur toutes les stations d'échantillonnage ainsi que la pénétration et le dépôt des gouttelettes dans le couvert végétal. Les échantillons ont ensuite été prélevés et entreposés à environ -10°C, jusqu'à ce que les dépôts soient quantifiés par chromatograhie liquide à haute performance (CLHP).

Quantification du glyphosate

Les dépôts de pulvérisation ont été lavés des feuilles collectrices par sonication avec de l'acide chlorhydrique 0,1N, suivie d'une agitation mécanique. Les liquides de rinçage des feuilles au sol ont été nettoyés avec des colonnes d'échange anionique et cationique selon la méthode décrite par Cowell et collab. (1986). Les échantillons ont ensuite été filtrés (filtre Millipore SLHV 025 NS à pores de 0,45 micron) et les résidus de glyphosate et de son principal métabolite, l'acide aminométhyle-phosphonique (AMPA), ont été quantifiés par CLHP. La détection et la dérivation ont été faites à l'aide d'une méthode mise au point par Monsanto (1983, rapport inédit). Le chromatographe a été ajusté à l'aide d'un détecteur de lumière à ondes variables UV/vis et un réacteur postcolonne de ninhydrine. Les résidus de glyphosate et d'AMPA ont été quantifiés en mesurant la

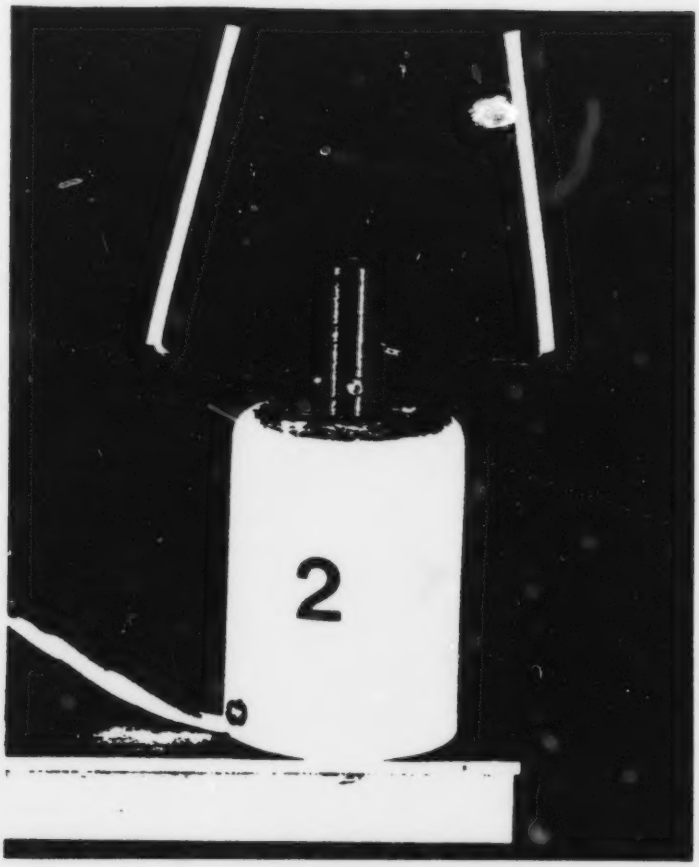

Figure 3. Échantillonneur Rotorod muni d'une tige en forme de U et collecteurs en teflon.

hauteur des pics du détecteur qui ont ensuite été interprétés par comparaison avec les étalons analytiques injectés tous les deux échantillons. Avec cette méthode, la limite de quantification du glyphosate était d'environ 500 ng, tandis que celle de l'AMPA était d'environ 150 ng. L'AMPA comprenait moins de 6 % de résidus de glyphosate dans tous les échantillons obtenus.

Évaluation de la largeur de la zone-tampon nécessaire autour des plans d'eau

La quantité totale d'ingrédient actif déposée à la surface des plans d'eau sous le vent à la suite d'une pulvérisation sur bandes multiples a été calculée à l'aide d'un programme informatique en additionnant l'apport de chaque bande de terrain. Le rapport dépôt/distance utilisé dans ce programme était basé sur les mesures expérimentales du dépôt de glyphosate sur une seule bande de terrain à raison d'une dose d'application d'ingrédient actif de 2,1 kg/ha, avec interpolation entre les points de données. Cette interpolation a été faite en supposant que le dépôt de glyphosate à la surface des plans d'eau variait suivant l'équation suivante:

$$J = A.x^B \qquad \text{Équation 1}$$

où J est le dépôt de glyphosate ($\mu g/m^2$), x la distance sous le vent de la bande traitée, et A et B, les constantes. Il s'agit de l'équation mathématique généralement utilisée pour décrire le rapport dépôt/distance au-delà de la distance du dépôt maximal (Pasquill, 1974; Sutton, 1953).

Le modèle mathématique utilisé pour calculer le dépôt hors-cible était basé sur les mesures de dépôt sur une seule bande de terrain et nécessitait une extrapolation à partir d'une distance aval de 200 m jusqu'à 1 km. La courbe ajustée en fonction des mesures du dépôt hors-cible a été extrapolée au-delà de la limite de 200 m sous le vent à l'aide de la courbe obtenue par l'interpolation des mesures aux stations sous le vent de 100 et de 200 m. Cette extrapolation donne une surévaluation du dépôt du nuage de pulvérisation, et ce pour deux raisons: premièrement, les bandes de terre traitées sont sujettes à un étalement perpendiculaire au vent par diffusion atmosphérique. Cet élargissement latéral dilue le nuage de pulvérisation et réduit la concentration des gouttelettes en suspension dans l'air et, du même coup, celle du dépôt du nuage de pulvérisation. Deuxièmement, le nuage de pulvérisation est «criblé» à mesure qu'il se déplace en aval parce que l'efficacité de l'impact inertiel augmente avec la taille des gouttelettes. Les grosses gouttelettes se déposent donc plus vite que les petites, et ainsi la vitesse moyenne du dépôt du nuage de pulvérisation est réduite et le dépôt de la pulvérisation et le dépôt réel est inférieur à la valeur extrapolée. Cette surestimation du dépôt du nuage de pulvérisation est conforme au scénario du pire cas utilisé dans le cadre de la présente étude.

La largeur des zones-tampons est évaluée de la façon suivante. À l'aide du modèle, le dépôt de glyphosate a été calculé à diverses distances sous le vent du lieu de pulvérisation de 1 sur 1 km. Le dépôt de glyphosate prévu a ensuite été converti en une concentration de glyphosate dans l'eau, en supposant un mélange complet et uniforme à diverses profondeurs de l'eau, sans autre dilution. Cette supposition constitue le pire cas possible étant donné que le glyphosate est adsorbé rapidement par les matières particulaires en suspension, ce qui réduit sa disponibilité pour les organismes aquatiques (Tooby, 1985); d'autre part, les populations de saumons et de truites, qui nécessitent une protection contre les pesticides, fréquentent les eaux soumises à des courants qui causent un phénomène de dilution. La largeur des zones-tampons a été évaluée à partir d'une distance sous le vent à laquelle la concentration prévue de glyphosate est inférieure à la teneur admissible, établie par des mesures publiées sur la toxicité du glyphosate pour le poisson et les invertébrés aquatiques.

Résultats et analyse

Mesures météorologiques

Les conditions météorologiques au cours des essais (tableau 2) constituaient le pire cas possible nécessaire pour maximiser le dépôt de glyphosate à la surface de l'eau.

Mesures du dépôt hors-cible

Les figures 4(a) et 4(b) indiquent respectivement les mesures du dépôt de glyphosate (g/m^2) sur les feuilles au sol et le couvert des feuilles, à diverses distances sous le vent d'une seule bande pulvérisée perpendiculairement au vent avec une dose d'ingrédient actif de 2,1 kg/ha d'équivalent acide. Les mesures réelles ont été ajustées en fonction de cette dose. Les mesures représentent le dépôt moyen à partir d'une seule bande de pulvérisation. Le tableau 3 présente les mesures ajustées du dépôt de glyphosate (g/m^2) sur les surfaces collectrices Rotorod à diverses distances sous le vent d'une application semblable. Le rapport du dépôt foliaire de glyphosate à la cime des arbres au dépôt à 2 m du sol était de 1,24 (É.-T. = 1,00, n = 9) basé sur la moyenne de toutes les stations d'échantillonnage et de tous les essais. Ce rapport indique que le dépôt foliaire moyen du nuage de pulvérisation augmentait lentement à mesure qu'on s'élevait au-dessus du sol.

Il apparaît, d'après les figures 4(a) et (b) et le tableau 3, que les dépôts hors-cible de glyphosate et les doses de glyphosate par unité de surface étaient en général les plus faibles pour l'application au MICROFOIL et les plus élevés dans le cas de l'application à la buse hydraulique D8-46. Ces mesures sont conformes aux granulométries prévues des gouttelettes présentées ci-dessus, ce qui indique que le volume d'herbicide pulvérisé en gouttelettes dont le diamètre est inférieur à 100 µm était le plus élevé dans le cas de l'application au D8-46 et le plus faible dans le cas de l'application au MICROFOIL.

Les dépôts de glyphosate sur les feuilles au sol au cours de l'essai numéro 1 (MICROFOIL) étaient inférieurs d'un facteur de 10 à 100 à ceux des essais numéro 2 (TVB) et numéro 3 (D8-46), à 75 m et moins de la piste. Cependant, à partir de 200 m et plus sous le vent, les dépôts de glyphosate sur les feuilles au sol des essais numéro 1 et numéro 2 étaient semblables, et à peu près la moitié de ceux relevés dans l'essai numéro 3. Les dépôts foliaires de glyphosate à 50 m sous le vent de l'application au MICROFOIL (essai numéro 1) étaient de 10 à 50 fois inférieurs à ceux mesurés lors des deux autres applications. Contrairement aux dépôts de glyphosate sur les feuilles au sol, on a trouvé de grandes différences dans le dépôt foliaire de glyphosate à 200 m sous le vent; ce dépôt était anormalement élevé au cours de l'essai numéro 1 (MICROFOIL). Les résidus de glyphosate recueillis par les tiges Rotorod à 50 m sous le vent, au cours de l'essai numéro 1 étaient inférieurs à ceux des essais numéro 2 (TVB) et numéro 3 (D8-46) par des facteurs respectifs d'environ 5 et 35. Dans les essais numéros 2 et 3, le glyphosate recueilli par les tiges Rotorod à 200 m sous le vent de la bande traitée était indécelable (les résidus étaient inférieurs à 200 ng). Le dépôt Rotorod mesuré à 200 m au cours de l'essai numéro 1 était anormalement élevé. Dans les essais numéros 1 et 2, les dépôts de glyphosate sur les feuilles de polyéthylène au sol étaient plus élevés que ceux qui recouvraient les feuilles des arbres, mais ce n'était pas le cas dans l'essai numéro 3.

Tableau 2. Mesures météorologiques au cours des applications et de la dispersion du nuage de pulvérisation (moyenne/É.-T.)

Numéro de l'essai	1	2	3
Date de l'essai	19/9/84	30/9/84	30/9/84
Début de la pulvérisation	19 h 15	16 h 30	19 h 20
Coucher du soleil (heure normale du Pacifique)	20 h 46	20 h 22	20 h 22
Couche nuageuse (huitièmes)	0-1	5-6	8
Vitesse du vent à 13 m au-dessus du sol (m/s)	0,4/-	0,5/0,2	0,4/0,1
Vitesse du vent à 22 m au-dessus du sol (m/s)	0,8/0,3	0,9/0,3	0,6/0,3
Température de l'air au faîte des arbres, 13 m au-dessus du sol (°C)	8	15	11
Température de l'air à 22 m au-dessus du sol (°C)	10	16	12
Humidité relative (%)	80	76	88
Stabilité de la couche atmosphérique des premiers 20 m	Stable	Stable	Stable

Tableau 3. Mesures du dépôt de glyphosate (µg/m^2) sur les surfaces collectrices Rotorod à diverses distances sous le vent d'une seule bande pulvérisée perpendiculairement au vent avec une dose d'application d'ingrédient actif de 2,1 kg/ha d'équivalent acide

Distance aval (m)	Dépôt sur les surfaces collectrices Rotorod (µg/m2)		
	MICROFOIL	TVB	D8-46
50	380	1 960	13 400
100	103	195	536
200	130	<71	<71

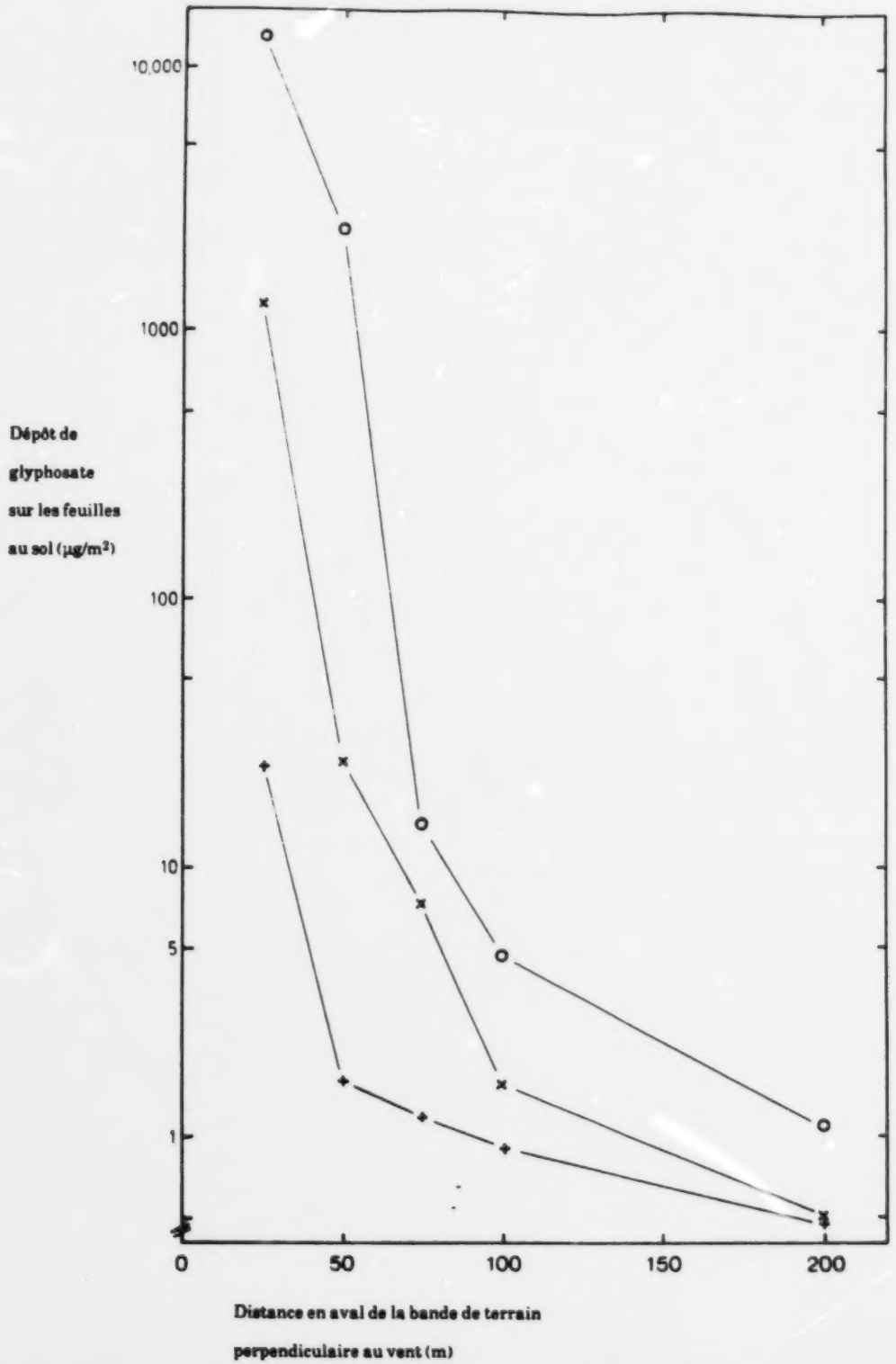

Figure 4. (a). Dépôt de glyphosate sur les feuilles au sol en aval d'une seule bande de terrain traitée par voie aérienne, avec une dose d'application d'ingrédient actif de 2,1 kg/ha d'équivalent acide. Les numéros 1, 2 et 3 indiquent le numéro des essais.

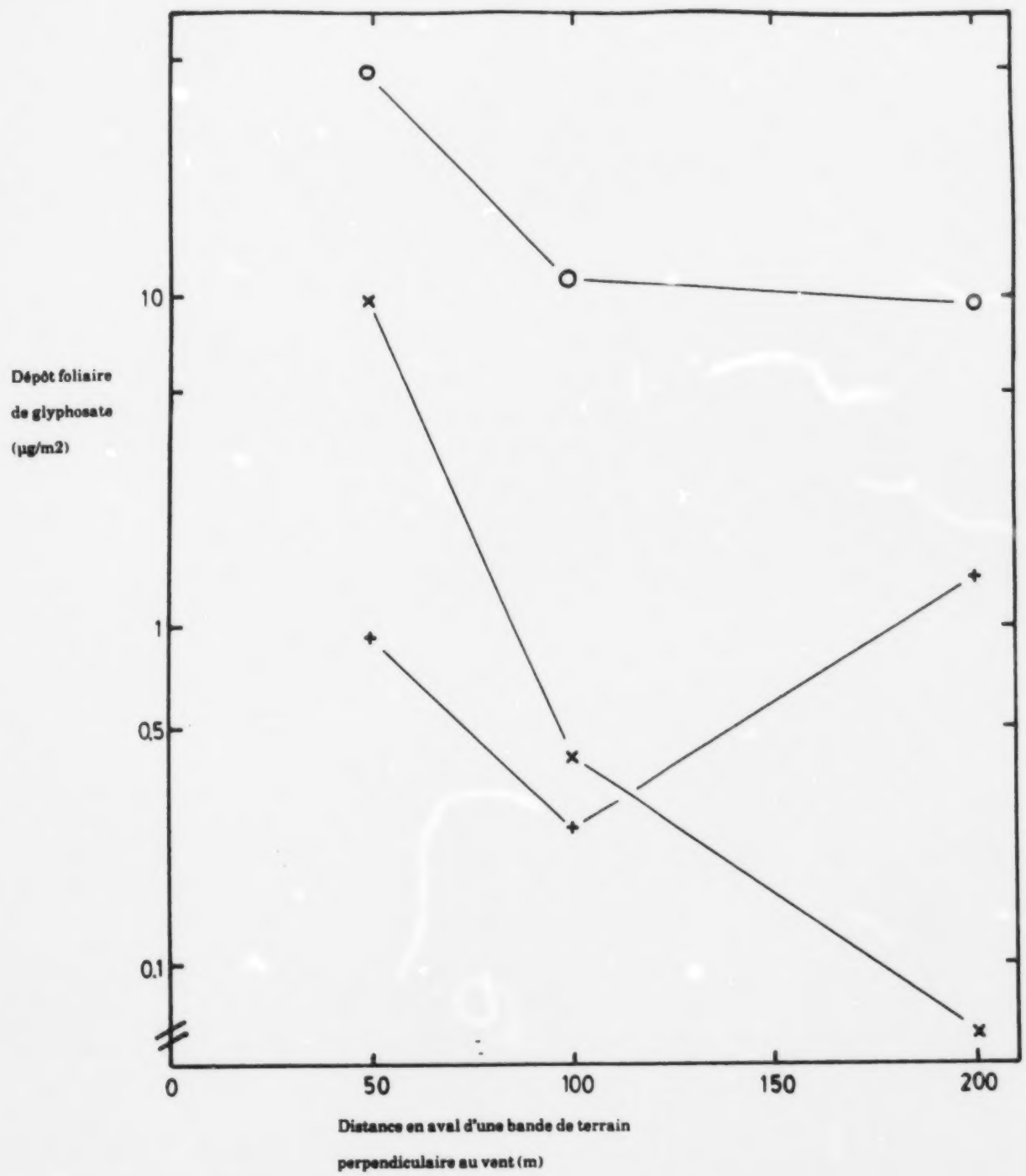

Figure 4. (b). **Dépôt foliaire de glyphosate en aval d'une seule bande de terrain traitée par voie aérienne, à raison d'une dose d'application d'ingrédient actif de 2,1 kg/ha d'équivalent acide. Les numéros 1, 2 et 3 indiquent le numéro des essais.**

Dépôt hors-cible des applications sur bandes multiples

Les dépôts de glyphosate à la surface de l'eau en aval d'applications de Roundup sur des bandes multiples à raison de 2,1 kg/ha d'équivalent acide ont été calculés à l'aide du modèle susmentionné. Les prévisions du modèle sont présentées à la figure 5. Une largeur de terrain de 13 m a été utilisée pour l'application au MICROFOIL et une largeur de 15 m, pour les applications au TVB et au D8-46. Dans le cas du MICROFOIL, l'extrapolation des résultats en aval du point de données de 200 m a été faite à l'aide de l'équation d'interpolation entre les points de données de 100 et de 200 m. Dans le cas des applications au TVB et au D8-46, l'extrapolation des résultats au-delà des 200 m a été faite à l'aide de la valeur (B) obtenue par extrapolation de l'application au MICROFOIL. Les valeurs dérivées des applications au TVB et au D8-46 de la figure 4(a) donneraient une atténuation plus rapide du dépôt que dans le cas de la valeur calculée à partir de l'application au MICROFOIL. On croit qu'il s'agit là d'une hypothèse irréaliste étant donné les proportions du volume de pulvérisation en gouttelettes dont le diamètre est inférieur à 100 µm. Aucune extrapolation n'a été faite en amont de la station d'échantillonnage de 25 m en raison du déplacement du champ de pulvérisation (voir ci-dessous). Le tableau 4 indique les distances sous le vent de la bande de terrain la plus proche auxquelles le dépôt calculé de glyphosate à la surface de l'eau se situe à 0,1, 1 ou 5 % de la dose d'application d'ingrédient actif, c'est-à-dire 210, 2 100 et 10 500 g/m^2.

Tableau 4. Distances à partir de la dernière bande de terrain traitée sous le vent où le dépôt de glyphosate sur les feuilles de polyéthylène fixées au sol atteint 5, 1 et 0,1 % d'ingrédient actif d'une dose de 2,1 kg/ha d'équivalent acide

Dépôt de glyphosate en pourcentage de 2,1 kg/ha (%)	Distance sous le vent de la dernière bande de terrain traitée (m)		
	Microfoil	TVB	D8-46
5	<25	<25	28
1	<25	<25	49
0,1	<25	35	62

Effet biologique du glyphosate dans les plans d'eau

L'effet biologique des dépôts calculés de glyphosate sur l'eau résultant d'une application de Roundup sur une superficie de 1 sur 1 km (figure 5) a été évalué à l'aide de données toxicologiques provenant de plusieurs études.

La toxicité du Roundup pour le poisson a été mesurée par la firme d'experts-conseils EVS Consultants au cours d'essais statiques effectués pour Monsanto (1986a-d), sur des smolts de coho et de kinat (*Oncorhynchus kisutch* et *O. tshawytscha*) et des alevins de truite arc-en-ciel (*Salmo gairdneri*). Les essais ont révélé qu'après une exposition de 10 jours au Roundup à des concentrations allant jusqu'à 3,2 mg de Roundup/L en eau douce, les smolts de saumon coho pouvaient survivre et s'adapter à l'eau de mer. Les essais statiques ont donné respectivement des CL mesurées après 96 heures de 22,4, 20 et 26 mg de Roundup/L pour le coho, le kinat et la truite arc-en-ciel. On a signalé un taux de mortalité du poisson inférieur à 10 % pour les concentrations atteignant un maximum de 6,6 mg de Roundup/L.

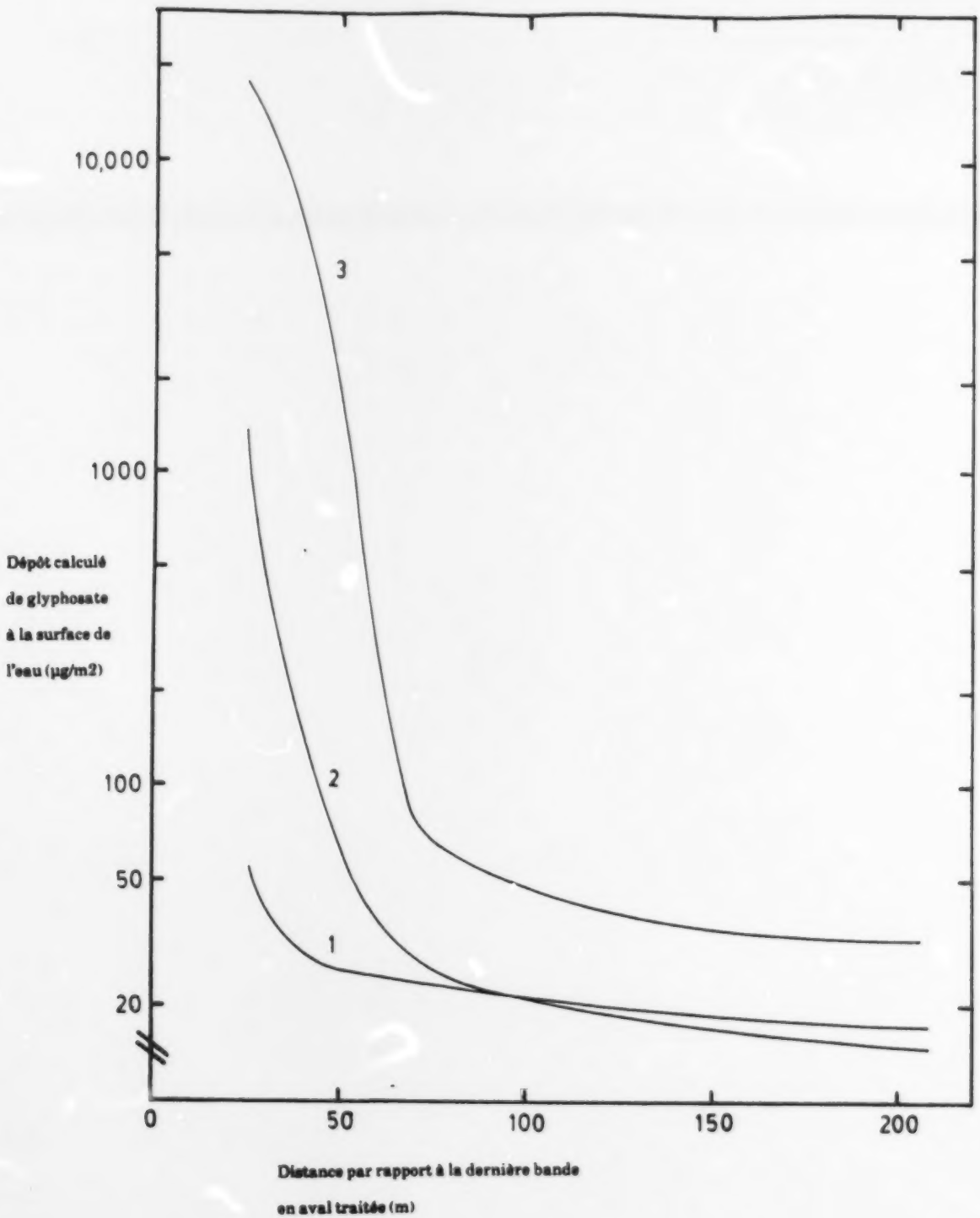

Figure 5. Dépôt calculé de glyphosate à la surface de l'eau en aval d'une application sur bandes multiples couvrant une superficie totale de 100 ha (1 sur 1 km) à raison de 2,1 kg/ha d'équivalent acide. Les numéros 1, 2 et 3 indiquent le numéro des essais.

Hildebrand et collab. (1982) ont étudié les effets du Roundup sur les populations de truitelles et signalé respectivement des CL après 96 heures de 52 et de 54,8 mg de Roundup/L pour les bioessais faits sur le terrain et en laboratoire. Le Roundup était également appliqué manuellement dans des cours d'eau peu profonds en forêt dans lesquels on avait aménagé des enclos contenant des truitelles (2,3 g) à des profondeurs variant de 15 à 29 cm. Des doses d'application d'ingrédient actif de 2,2, de 22 et de 220 kg/ha d'équivalent acide ont été utilisées au cours de pulvérisations directement au-dessus du cours d'eau. Aucune truite n'est morte et on n'a observé aucun symptôme de stress ni de troubles physiques. Les concentrations de glyphosate dans l'eau n'ont pas été relevées.

Une étude faite par Folmar et collab. (1979) signale des toxicités aigus du Roundup à partir d'essais statiques sur divers poissons et divers invertébrés aquatiques. Les CL après 96 heures pour la truite arc-en-ciel et le tête-de-boule (*Pimephales promelas*) adultes étaient respectivement de 8,3 et de 23 mg de Roundup/L. Le stade de développement de la truite arc-en-ciel le plus vulnérable au Roundup était celui de la truitelle (1,0 g) avec une CL après 96 heures de 1,3 mg de Roundup/L. On n'a observé aucun changement au niveau de la fécondité chez la truite arc-en-ciel adulte exposée pendant 12 heures à 2,0 mg de Roundup/L. La TE 50 après 48 heures (concentration d'immobilisation) mesurée pour le premier stade larvaire des daphnies (*Daphnia magna*) et le quatrième stade larvaire des daphnies (*Chironomus plumosus*) était respectivement de 3,0 et de 18 mg de Roundup/L.

Hildebrand et collab. (1980) ont également étudié l'effet du Roundup sur les populations de daphnies (*D. magna*). Ces abondantes populations d'invertébrés aquatiques forment une partie importante de l'alimentation du poisson (Crosby et Tucker, 1966). Une application manuelle de Roundup a été faite dans des étangs de forêt contenant des enclos dans lesquels on avait placé des *D. magna* adultes. Ces enclos maintenaient les organismes dans la couche supérieure des 30 cm. On a utilisé des doses d'application d'ingrédient actif de 2,2, de 22 et de 220 kg/ha d'équivalent acide pour une pulvérisation directe. Le taux de survie dépassait 90 % dans tous les essais, et le taux de survie des organismes-témoins était semblable à celui obtenu avec une dose de 220 kg/ha d'équivalent acide. On n'a pas relevé les concentrations de glyphosate dans l'eau.

D'après l'étude en laboratoire EVS susmentionnée, 1,0 mg de Roundup/L, soit l'équivalent d'environ 0,3 mg de glyphosate équivalent acide par litre, limiterait le taux de mortalité à moins de 10 % dans les populations de smolts de saumon et d'alevin de truite arc-en-ciel. De plus, l'étude faite par Hildebrand et collab. (1982) n'indiquait aucune mortalité de la truite arc-en-ciel avec des concentrations théoriques de Roundup de 249-480 mg/L au cours de pulvérisations directes. Par contre, l'étude en laboratoire faite par Folmar et collab. (1979) révèle que des concentrations de 1,0 mg de Roundup/L, maintenues pendant 96 heures, pourraient entraîner un taux de mortalité d'environ 50 % chez la plupart des spécimens parvenus au stade de vie le plus vulnérable de la truite arc-en-ciel. L'étude faite sur le terrain par Hildebrand et collab. (1980) donnait un taux de survie supérieur à 90 % chez les *D. magna* adultes à des concentrations théoriques de 250 mg de Roundup/L, après pulvérisation directe.

Évaluation de la largeur de la zone-tampon

Le tableau 5 indique les concentrations prévues de Roundup (µg/L) dans les plans d'eau à diverses distances sous le vent d'une application de Roundup sur une superficie de 100 ha à l'aide des trois stratégies expérimentées. La largeur de la zone-tampon nécessaire autour des nappes d'eau pour limiter la concentration de Roundup à 1 mg/L a été évaluée pour des profondeurs d'eau de 0,1, de 0,25 et de 0,5 m. Pour chaque combinaison de stratégie d'application et de profondeur d'eau, les distances sous le vent de la bande finale de terre traitée où les concentrations maximales de Roundup sont de 1 mg/L sont inférieures à 25 m. On considère donc qu'une zone-tampon d'une largeur de 25 m est adéquate pour limiter les dépôts hors-cible des petites gouttelettes à une concentration choisie pour les trois stratégies d'utilisation essayées. Il n'est pas conseillé d'extrapoler les données sur les dépôts de

pulvérisation à des distances inférieures à 25 m afin d'évaluer une largeur-tampon plus précise en raison de la dérive du nuage de pulvérisation, comme on l'explique ci-après.

Le modèle et les données de cette étude peuvent être utilisés pour évaluer la largeur des zones-tampons pour les applications de pulvérisation semblables à celles testées, mais avec des doses et des superficies d'application différentes. Cependant, les données provenant de la présente étude ne peuvent être appliquées directement à d'autres stratégies d'utilisation, par exemple l'utilisation de différents systèmes de dispersion, débits d'émission ou vitesses de l'air, en raison des différences dans la taille des gouttelettes. Lorsqu'il existe des mesures de la phytotoxicité des dépôts sublétaux de glyphosate, on peut utiliser les mesures du dépôt hors-cible obtenues grâce à la présente étude pour évaluer la largeur de la zone-tampon nécessaire pour protéger la végétation riveraine et autre.

Dérive du champ de pulvérisation

La dérive du champ de pulvérisation ou le déplacement des «grosses» gouttelettes a été évaluée pour les trois stratégies d'application expérimentées dans le cadre de la présente étude, dans les pires conditions météorologiques possibles pour le déplacement des «petites» et de «grosses» gouttelettes. Le temps de vol des grosses gouttelettes est plus court que celui des petites, étant donné que la vitesse de sédimentation augmente avec la grosseur. Dans les essais dont il est question, le temps de vol des grosses gouttelettes variait généralement de 1 à 10 secondes. L'évaporation des gouttelettes était faible au cours de ce vol, étant donné que la durée de vie des gouttelettes est beaucoup plus longue que le temps de vol; par exemple une goutte d'eau d'un diamètre de 200 µm a une durée de vie d'environ 200 secondes dans l'air à 20°C avec une humidité relative de 80 % (Matthews, 1979). La vitesse du vent est la variable météorologique qui influe le plus sur le déplacement des grosses gouttelettes : plus la vitesse est élevée, plus le déplacement est important. La stabilité atmosphérique influe également sur le déplacement du champ de pulvérisation en raison de son effet sur le profil horizontal du vent. Étant donné la faible hauteur des essais de pulvérisation, les effets de la stabilité sur le déplacement ont été négligeables et ils ont été ignorés dans l'évaluation du déplacement du champ de pulvérisation.

Tableau 5. Concentrations prévues de Roundup (µg/L) dans les plans d'eau à diverses distances sous le vent, par rapport aux applications de 2,1 kg de Roundup/ha d'équivalent acide sur une superficie de 100 ha

Distance aval (m)	Essai nº 1			Essai nº 2			Essai nº 3		
	Profondeur de l'eau (m)								
	0,1	0,25	0,5	0,1	0,25	0,5	0,1	0,25	0,5
25	1,77	0,72	0,36	46	18	9,2	590	240	120
50	0,85	0,33	0,17	2,0	0,82	0,39	82	32	16
75	0,79	0,31	0,15	0,99	0,39	0,20	2,2	0,89	0,46

Le déplacement du champ de pulvérisation a été évalué à l'aide des équations de ballistique (Pasquill, 1974). On a fait les hypothèses suivantes. La partie «grosses gouttelettes» du nuage de pulvérisation a été représentée par le volume des gouttelettes moyennes, et la vitesse de sédimentation a été choisie en conséquence. On a supposé que le nuage de pulvérisation était transporté horizontalement dans sa chute de 3 m (au-dessus du couvert végétal) et dans le tiers supérieur de ce couvert (1/3 x 18 m = 6 m). À l'intérieur du couvert forestier, la vitesse du vent

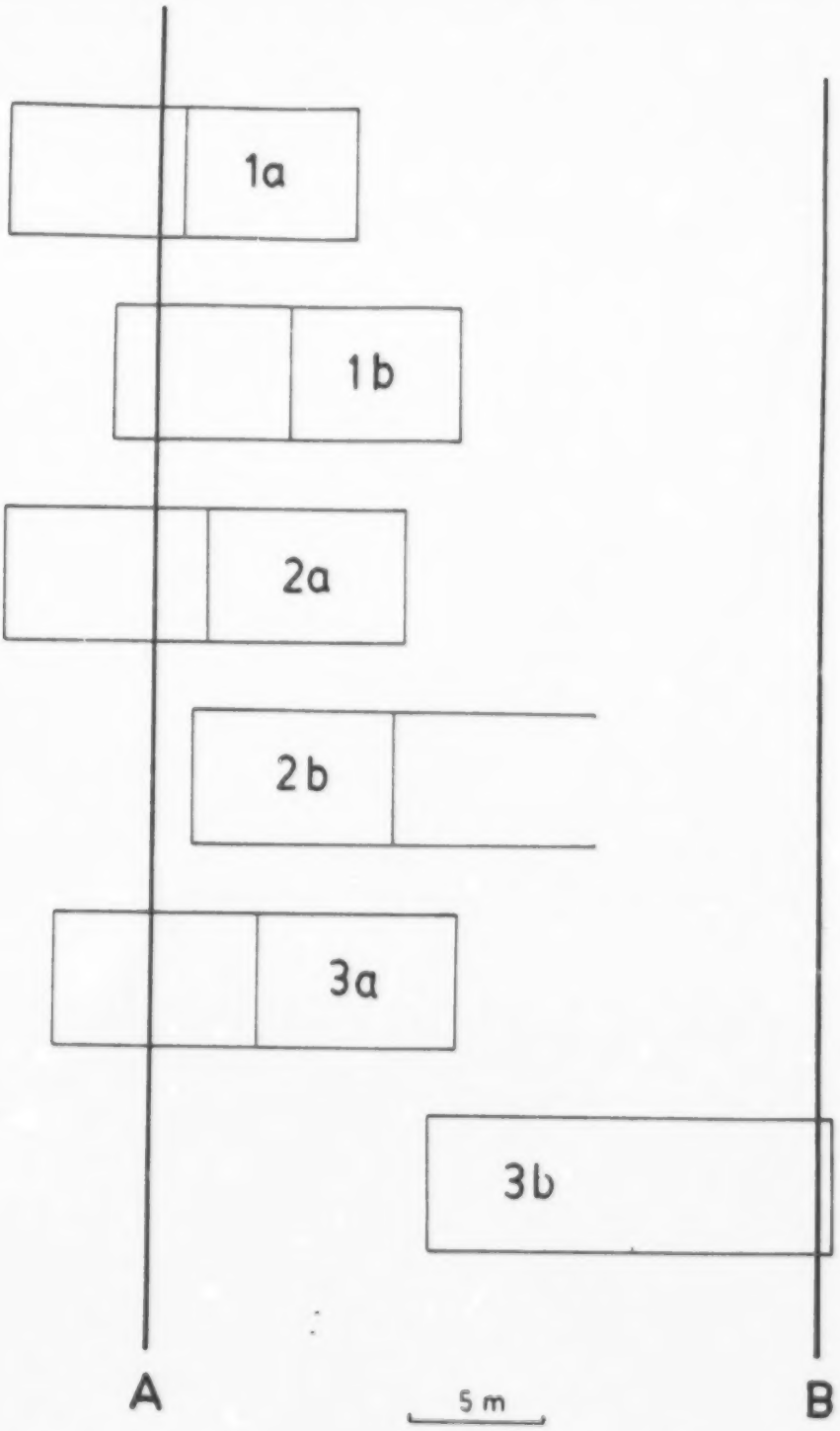

Figure 6. Emplacement du dépôt des grosses gouttelettes par rapport à la ligne de pulvérisation perpendiculaire au vent (A) et la ligne (B) à 25 m en aval (à l'échelle). Les numéros 1, 2 et 3 indiquent le numéro des essais, les suffixes a et b désignent les vitesses du vent de 1 et de 4 m/s.

augmente proportionnellement à la hauteur, mais cette vitesse est faible dans les deux tiers inférieurs (Oliver, 1971 et 1975) et il y a très peu de transport horizontal. La vitesse horizontale moyenne du vent au faîte des arbres a été utilisée pour calculer le déplacement. En effet, la vitesse horizontale moyenne du vent au-dessus et au-dessous de cette hauteur est respectivement supérieure et inférieure à la vitesse au faîte des arbres, ce qui donne une bonne approximation. L'effet des deux vortex contrarotatifs produit par l'aéronef sur le déplacement du champ de pulvérisation a été considéré comme peu important, car les vortex étalent le nuage autour du centre de sa masse au lieu de déplacer tout le nuage horizontalement. Les zones traitées étaient perpendiculaires au vent.

Dans le cas de l'application au MICROFOIL, le diamètre médian des gouttelettes (DMG) était d'environ 3 000 µm. Une gouttelette d'eau de cette taille a une vitesse de sédimentation d'environ 8,1 m/s (Rogers, 1979). Dans les applications au TVB et au D8-46, les DMG étaient d'environ 1 000 et 460 µm. Les vitesses de sédimentation des gouttelettes d'eau de ce diamètre sont respectivement d'environ 3,9 et 1,9 m/s (Hinds, 1982).

Aux vitesses de vent utilisées au cours des essais mentionnés dans ce rapport, soit environ 1 m/s au faîte des arbres, le déplacement du champ de pulvérisation, c'est-à-dire la distance du centre du dépôt de pulvérisation à la ligne d'aspersion par MICROFOIL, TVB et D8-46, a été évalué respectivement à 1,2 et à 4 m. Dans les pires conditions possibles pour le déplacement des grosses gouttelettes, avec une vitesse horizontale moyenne du vent de 4 m/s (environ 16 km/h), les déplacements du champ de pulvérisation ont été évalués respectivement à environ 5,9 et 18 m. Il faut remarquer que ces déplacements se rapportent à la partie du nuage de pulvérisation faite de grosses gouttelettes et permettent de prévoir le déplacement moyen. Certaines grosses gouttelettes sont transportées plus loin, d'autres moins loin.

La valeur de cette évaluation du déplacement du champ de pulvérisation permet de comparer le déplacement des petites et des grosses gouttelettes. La figure 6 indique la position estimative du champ de pulvérisation par rapport à la ligne d'aspersion pour les trois types d'application utilisés, avec des vitesses horizontales moyennes du vent de 1 et de 4 m/s. Les largeurs de bandes traitées étaient celles décrites plus haut. D'après les mesures du déplacement des petites gouttelettes, une zone-tampon de 25 m à partir de la dernière bande aval traitée assure la protection du poissons et des invertébrés aquatiques contre les effets toxicologiques majeurs et directs du glyphosate. Cependant, lorsqu'on tient compte du déplacement des grosses gouttelettes, il apparaît que dans le cas de l'application au D8-46, il faut prévoir une zone-tampon plus large pour empêcher le nuage de pulvérisation d'atteindre le plan d'eau.

Effet de la pulvérisation de Roundup

On a calculé la concentration d'ingrédient actif dans l'eau à la suite d'une pulvérisation directe de Roundup. On a supposé que tout l'ingrédient actif avait été déposé dans la région pulvérisée pour établir le scénario du pire cas possible. Dans le cas d'une pulvérisation directe sur un plan d'eau calme d'une profondeur de 0,1 m, en supposant un mélange complet et uniforme et aucune autre dilution, la concentration de glyphosate (équivalent acide) est de 2,1 mg/L. Dans l'eau courante, il y a dilution, ce qui réduit la concentration. Cependant, la valeur acceptable suggérée est de 0,3 mg/L. Une comparaison de ces concentrations de glyphosate indique qu'une pulvérisation directe au Roundup peut causer une mortalité inacceptable dans les plans d'eau peu profonds.

Conclusions

Dans cette étude, le dépôt hors-cible résultant de diverses applications aériennes de glyphosate (Roundup) a été mesuré et la largeur de la zone-tampon requise autour des plans d'eau pour protéger le saumon, la truite arc-en-ciel et divers invertébrés aquatiques contre les effets toxicologiques majeurs

et directs du produit a été évaluée. En général, les dépôts hors-cible les moins importants et les plus importants provenaient respectivement des applications au MICROFOIL et au D8-46. Les modèles de calcul pour une application de glyphosate sur une superficie de 100 ha (1 sur 1 km), basés sur des données expérimentales, indiquent que les dépôts de glyphosate à la surface de l'eau ne sont que de 1 % de la dose d'application maximale recommandée d'ingrédient actif (2,1 kg/ha d'équivalent acide) à des distances sous le vent de la dernière bande traitée de moins de 25 m pour les applications du MICROFOIL et du TVB, et d'environ 49 m pour l'application au D8-46. Dans le cas des stratégies d'application du MICROFOIL et du TVB, une largeur-tampon de 25 m à partir de la dernière bande traitée sous le vent limitera les concentrations prévues de Roundup à moins de 1 mg/L dans des profondeurs d'eau supérieures à 10 cm. Dans le cas de l'application à la buse hydraulique D8-46, il faut une zone-tampon de 30 m pour prévenir le déplacement du champ de pulvérisation en présence de grands vents qui entraîneraient des concentrations supérieures à cette teneur.

Bibliographie

Atkinson, B.W. 1981. Meso-scale atmospheric circulations. Academic Press,Londres, Angleterre.

Beveridge, W.J.; Payne, N. 1986. A light-weight mast for use in meteorological or spray drift studies. Forest Pest Management Institute, Technical, Note number 5.

Cowell, J.E.; Kunstman, J.L.; Nord, P.J.; Steimetz, J.R.; Wilson, G.R. 1986. Validation of an analytical residue method for analysis of glyphosate and metabolite : an interlaboratory study. J. Agric. Food Chem. 34:995-960.

Crabbe, R.S.; Elias, L.; Davie, S.J. 1983. Field study of the effect of atmospheric stability on target deposition and effective swath width for aerial forest sprays in New Brunswick, Part II. LTR-UA-65, NAE, NRC, Canada.

Crabbe, R.S.; McCooeye, M. 1985. Effect of atmospheric stability and windspeed on wind drift in aerial forest spray trials, neutral to unstable conditions. LTR-UA-82, NAE, NRC, Canada.

Crosby, D.G.; Tucker, R.K. 1966. Toxicity of aquatic herbicides to *Daphnia magna*. Science. 154:289.

Davies, C.N. 1966. Deposition from moving aerosols. Pages 393-446 *in* C.N. Davies, ed. Aerosol Science. Academic Press, London, England.

Davis, R.E.; Kelly J.W. 1967. Elementary plane surveying. 4th ed. McGraw Hill Book Company, New York, USA.

Folmar, L.C.; Sanders, H.O.; Julin, A.M. 1979. Toxicity of the herbicide glyphosate and several of its formulations to fish and aquatic invertebrates. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 8:269-278.

Hildebrand, L.D.; Sullivan, D.S.; Sullivan, T.P. 1980. Effects of Roundup on populations of *Daphnia magna* in a forest pond. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 25:353-357.

Hildebrand, L.D.; Sullivan, D.S.; Sullivan, T.P. 1982. Experimental studies of rainbow trout populations exposed to field applications of Roundup herbicide. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 11:93-98.

Hinds, W.C. 1982. Aerosol technology : properties, behavior and measurement of airborne particles. John Wiley and Sons, New York, USA.

Holst, R.W. 1983. Spray drift exposure assessment. Pages 83-91 *in* T.M. Kaneko and N.B. Akesson, eds. Pesticide formulations and application systems : 3rd symposium. ASTM STP 828. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.

Joyce, R.J.; Schaefer, G.W.; Allsopp, K. 1981. Distribution of spray and assessment of larval mortality at Annabaglish. Pages 15-46 *in* A.V. Holden and D. Bevan, eds. Aerial application of insecticide against Pine Beauty moth, Forestry Commission, U.K.

Matthews, G.A. 1979. Pesticide application methods. Longman, London, England.

May, K.R.; Clifford, R. 1967. The impaction of aerosol particles on cylinders, spheres, ribbons and discs. Ann. Occupational Hyg. 10:83-95.

Monsanto. 1983. Analytical methods for the determination of glyphosate and AMPA. Monsanto Company, 800 N. Lindbergh Blvd., St. Louis, MO.

Monsanto. 1986a. Seawater challenge testing of coho salmon smolts following Roundup herbicide exposure. EV-85-045. Monsanto Company, 800 N. Lindbergh Blvd., St. Louis, MO. 63167.

Monsanto. 1986b. Acute toxicity of Roundup herbicide to chinook salmon. EV-85-046. Monsanto Company, 800 N. Lindbergh Blvd., St. Louis, MO 63167.

Monsanto, 1986c. Acute toxicity of Roundup herbicide to coho salmon. EV-85-047. Monsanto Company, 800 N. Lindbergh Blvd., St. Louis, MO 63167.

Monsanto. 1986d. Acute toxicity of Roundup herbicide to rainbow trout. EV-85-048. Monsanto Company, 800 N. Lindbergh Blvd., St. Louis, MO 63167.

Nelburger, M.; Edinger, J.G.; Bonner, W.D. 1973. Understanding our atmospheric environment. W.H. Freeman and Co., San Francisco.

Oliver, H.R. 1971. Wind profiles in and above a forest canopy. Q.J.R. Meteorol. Soc. 97:548-553.

Oliver, H.R. 1975. Ventilation in a forest. Agric. Meteorol. 14:347-355.

Pasquill, F. 1974. Atmospheric diffusion : the dispersion of windborne material from industrial and other sources. 2nd ed. Ellis Horwood Ltd., Chichester, England.

Payne, N. 1983. A quantification of turbulent dispersal and deposition of coarse aerosol droplets over a wheat field. PhD Thesis, Cranfield Institute of Technology, Cranfield, Bedforshire, MK43 OAL, England.

Payne, N.; Helson, B.; Sundaram, K.; Kingsbury, P.; Fleming, R.; deGroot, P. 1986. Estimating the buffer required around water during permethrin applications. Canadian Forestry Service, Forest Pest Management Institute, Inf. Rep. FPM-X-70.

Quantick, H.R. 1985. Aviation in crop protection, pollution and insect control. William Collins Sons and Co. Ltd., London England.

Riddick, J.A.; Bunger, W.B. 1970. Techniques of chemistry, volume 2 : organic solvents; physical properties and methods of purification. 3rd ed. Wiley Interscience, New York, U.S.A.

Riley, C. 1985. Deposition of spray droplets within the forest canopy. Dunphy 1984. Report number C/84/006, Research and Productivity Council, Fredericton, N. B.

Rogers, R.R. 1979. A short course in cloud physics. 2nd ed. Pergamon Press Ltd., Oxford, England.

Scorer, R.S. 1978. Environmental aerodynamics. Ellis Horwood Ltd., Chichester, England.

Sutton, O.G. 1953. Micrometeorology : a study of the physical processes of the lower layers of the earth's atmosphere. McGraw-Hill Book Company Inc., New York, NY.

Thom, A.S. 1975. Momentum, mass and heat exchange of plant communities. Pages 57-109 *in* J.L. Monteith, ed. Vegetation and the atmosphere, volume 1, principles. Academic Press, London, England.

Tooby, T.E. 1985. Fate and biological consequences of glyphosate in the aquatic environment. Pages 206-217 *in* E. Grossbard and D. Atkinson, eds. The herbicide glyphosate. Butterworths, London, England.

van Vliet, M.W.; Henderson, G.W.; Picot, J.C. 1986. Spectrum characterizations of herbicide atomisers. PRUF contract report, Department of Chemical Engineering, University of New Brunswick.

WSSA (Weed Science Society of America). 1983. Herbicide Handbook. Champaign, Ill.

Yates, W.E.; Akesson, N.B.; Bayer, D.E. 1978. Drift of glyphosate sprays applied with aerial and ground equipment. Weed Science 26:597-604.

Yates, W.E.; Cowden, R.E.; Akesson, N.B. 1985. Atomization of herbicide simulants with hollow cone and raindrop nozzles. FPM 85-1. USDA, Forest Service, Forest Pest Management, Davis, CA 95616.